IPhO
Estonia 2012

43èmes Olympiades Internationales de Physique — Épreuve Expérimentale

Tartu, Estonie — Jeudi 19 Juillet 2012

- L'épreuve dure 5 heures. Il y a deux problèmes, rapportant au total 20 points. Vous avez deux tables à votre disposition (dans deux compartiments voisins), les appareils pour le problème E1 sur une table, et ceux pour le problème E2 sur l'autre ; vous êtes libres de vous déplacer entre les deux tables. **Toutefois, vous n'êtes pas autorisés à déplacer le matériel expérimental d'une table à l'autre.**
- Initialement, le matériel expérimental de l'une des tables est recouvert et celui de l'autre table est dans une boîte. **Avant que le signal marquant le début de la compétition retentisse (trois signaux courts), vous n'êtes autorisés ni à enlever la couverture, ni à ouvrir à la boîte, ni à ouvrir l'enveloppe contenant les problèmes.**
- **Vous ne pouvez pas quitter votre place sans permission.** Si vous avez besoin d'aide (**dysfonctionnement du matériel**, calculatrice en panne, besoin d'aller aux toilettes, etc), veuillez lever le drapeau correspondant "HELP" ou "TOILET" au-dessus de votre box jusqu'à ce qu'un surveillant arrive.
- Merci de n'utiliser que le recto des copies.
- Chaque problème a ses **Feuilles Réponse associées** (numéro et le pictogramme, voir en-tête). Rédigez vos réponses sur les Feuilles Réponse correspondant au Problème. Les Feuilles Réponse sont numérotées pour chaque Problème ; utilisez-les dans l'ordre. **Marquez toujours quelle partie du problème et quelle question vous traitez**. Recopiez les résultats finaux dans les cadres prévus de votre **Document Réponse**. Vous avez également à votre disposition du **Papier Brouillon** ; utilisez-le pour écrire tout ce qui sort du cadre de l'évaluation. Si, sur les Feuilles Réponse, vous avez ecrit quelque chose sur lequel vous ne voulez pas être évalué (réponse provisoire ou erronée), barrez-le.
- S'il vous faut davantage de copies pour un problème, veuillez lever le drapeau"HELP" et indiquez au surveillant le numéro du problème ; on vous fournira deux Feuilles Réponse (vous pouvez en redemander plusieurs fois).
- **Écrivez le moins de texte possible :** essayez d'expliquer votre réponse avec des équations, des nombres, des symboles ou des schémas.

- **Evitez tout mouvement non nécessaire pendant l'épreuve et ne secouez pas les murs de votre box : l'expérience avec le laser nécessite de la stabilité.**

- **Ne regardez pas directement le faisceau laser, ni ses réflexions ! Cela peut endommager définitivement vos yeux.**
- Le premier signal sonore (un signal simple) signifie qu'il vous reste 30 minutes de composition ; le deuxième (double) signifie qu'il vous reste 5 minutes ; le troisième signal (triple) marque la fin du temps de composition. **Après le troisième signal vous devez impérativement et immédiatement arrêter d'écrire.** Mettez toutes vos feuilles dans l'enveloppe sur votre table. **Vous n'êtes pas autorisés à emporter des documents hors de la salle.** Si vous avez fini de composer avant le troisième signal, merci de lever votre drapeau.

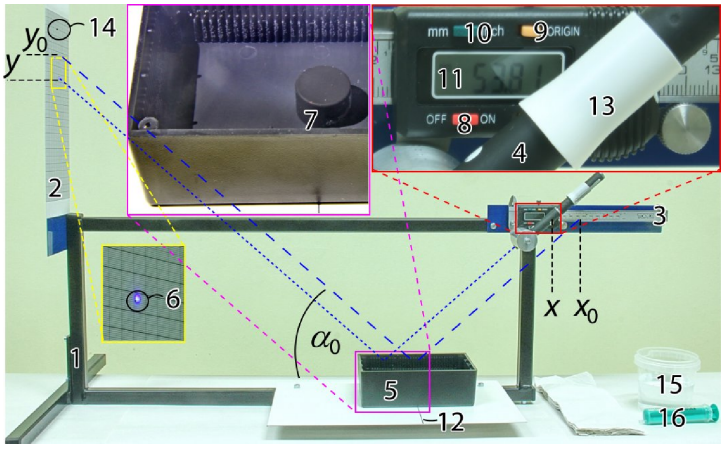
Problème E1. Perméabilité magnétique de l'eau *(10 points)*

L'effet du champ magnétique est plutôt faible sur la plupart des matériaux (excepté pour les ferromagnétiques). Ceci est dû au fait que la densité volumique d'énergie magnétique dans les matériaux de perméabilité magnétique relative μ est donnée par la formule $w = \frac{1}{2\mu\mu_0}B^2$, μ étant proche de 1. Toutefois, un protocole expérimental approprié permet d'observer ces effets. Dans ce problème, on étudie l'effet d'un champ magnétique (créé par un aimant néodyme permanent) sur l'eau. On utilise ensuite les résultats expérimentaux pour calculer la perméabilité magnétique de l'eau.

On ne vous demande aucun calcul d'incertitude dans le problème. On négligera tout effet lié à la tension de surface

Le montage comporte 1 un **support** (les numéros surlignés correspondent aux numéros sur la figure), 3 un **pied à coulisse numérique**, 4 un **pointeur laser**, 5 un **récipient contenant de l'eau** et 7 **un aimant permanent cylindrique** à l'intérieur (l'aimantation est axiale). Le récipient est fixé à la base du support par l'attraction de l'aimant. Le laser est fixé au pied à coulisse, dont la base est attachée au support. Le pied à coulisse permet un déplacement horizontal du laser. L'interrupteur du laser peut être maintenu en position "on" grâce au tube conique blanc 13. L'épaisseur de la couche d'eau recouvrant l'aimant doit être assez proche de 1 mm (si elle est inférieure, la surface de l'eau se déforme tellement qu'il est difficile de réaliser les mesures). Un gobelet d'eau 15 et une seringue 16 peuvent permettre d'ajuster le niveau de l'eau (il faut ajouter 13 millilitres d'eau pour remonter le niveau de 1 mm). On fixe une feuille de papier millimétré (l'écran) 2 sur la partie verticale du support, en utilisant de petits aimants 14 . Si la tache du laser sur l'écran s'étale, il y a probablement une poussière à la surface de l'eau (soufflez pour l'enlever).

Les autres numéros de la figure sont attribués comme suit : 6 point où le faisceau laser atteint l'écran ; 11 écran LCD du pied à coulisse, 10 bouton qui permet de changer l'unité de mesure du pied à coulisse (millimètres/pouces) ; 8 interrupteur ; 9 réglage de l'origine de la mesure du pied à coulisse. Derrière le pointeur laser, il y a un autre bouton qui réinitialise temporairement l'origine (si vous le pressez par inadvertance, pressez-le une seconde fois pour revenir au mode de mesure normal).



Valeurs numériques pour vos calculs : **distance horizontale** entre l'aimant et le centre de l'écran : $L_0 = 490\,\text{mm}$. Vérifiez (et ajustez si nécessaire) l'alignement du centre de l'aimant dans les deux directions. L'axe de l'aimant doit couper le faisceau laser, et doit aussi couper la ligne noire du support 12 (référence).

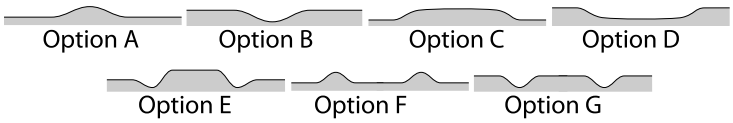
Champ magnétique sur l'axe de l'aimant, à 1 mm de la face plane : $B_0 = 0.50\,\text{T}$; **masse volumique de l'eau** : $\rho_w = 1000\,\text{kg/m}^3$; **accélération de la pesanteur** : $g = 9.8\,\text{m/s}^2$; **perméabilité magnétique du vide** : $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\,\text{H/m}$.

AVERTISSEMENTS:

- **L'orientation du laser est idéale, ne la changez pas !**
- **Ne regardez pas directement dans le faisceau laser ou ses réflexions !**
- **N'essayez pas de retirer le puissant aimant néodyme !**
- **Ne placez pas de matériaux magnétiques à proximité de l'aimant !**
- **Éteignez le laser si vous ne l'utilisez pas, les piles se vident en 1 h !**

Partie A. Forme qualitative de la surface de l'eau *(1 points)*

Quand on place un aimant sous la surface de l'eau, celle-ci se déforme. Observez la forme de la surface au-dessus de l'aimant. De cette observation, déduisez si l'eau est diamagnétique ($\mu < 1$) ou paramagnétique ($\mu > 1$).



Inscrivez dans votre Document Réponse la lettre correspondant à la forme observée, ainsi que l'inégalité correcte : $\mu > 1$ ou $\mu < 1$. **Il n'est pas demandé de justifier sa réponse dans cette partie.**

Partie B. Forme exacte de la surface de l'eau *(7 points)*

La courbure de la surface de l'eau peut être observée avec une grande précision en mesurant la déviation du faisceau laser réfléchi par la surface. On utilise cet effet pour déterminer comment varie la hauteur d'eau au-dessus de l'aimant.

i. (1.6 pts) Mesurez la dépendance de la hauteur y de la tache laser en fonction du déplacement x du pied à coulisse (voir figure). Utilisez la plus grande plage de déplacement possible du pied à coulisse. Remplissez le tableau de résultats de votre Document Réponse.

ii. (0.7 pts) Tracez le graphe associé.

iii. (0.7 pts) En utilisant le graphe obtenu, déterminez l'angle α_0 entre le faisceau et la surface de l'eau.

Indication : la pente en x ($\tan\beta$) de la surface de l'eau peut s'exprimer comme suit :

$$\tan\beta \approx \beta \approx \frac{\cos^2\alpha_0}{2} \cdot \frac{y - y_0 - (x - x_0)\tan\alpha_0}{L_0 + x - x_0},$$

où y_0 est la hauteur due la tache laser sur l'écran quand le faisceau est réfléchi par la surface de l'eau au niveau de l'axe de l'aimant et x_0 le déplacement correspondant du pied à coulisse.

iv. (1.4 pts) Calculez les valeurs de la pente et rentrez-les dans le tableau de votre Document Réponse. Notez qu'il peut être possible de simplifier vos calculs en remplaçant certaines expressions du calcul précédent par des valeurs lues sur le graphique précédent.

v. (1.6 pts) Calculez la hauteur de la surface de l'eau (par rapport à la surface loin de l'aimant) en fonction de x et reportez les résultats dans le tableau de votre Document Réponse.
vi. (1 pt) Tracez le graphe correspondant. Indiquez-y la région où le faisceau laser frappe la surface au-dessus de l'aimant.

Partie C. Perméabilité magnétique *(2 points)*

En utilisant les résultats de la Partie B, calculez la valeur de $\mu - 1$ (appelé *susceptibilité magnétique*), où μ est la perméabilité magnétique relative de l'eau. Reportez votre formule finale et l'application numérique dans votre Document Réponse.

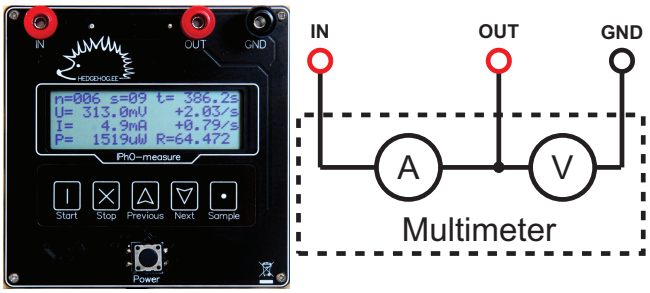
Problème E2. Boîte noire non-linéaire *(10 points)*

Dans les problèmes simples, les circuits électriques sont composés d'éléments linéaires, pour lesquels les caractéristiques électriques (tension et courant) sont proportionnelles entre elles. Ils contiennent par exemple des résistances ($V = RI$), capacités ($Q = CV$) et bobines ($V = L\dot{I}$), où R, C et L sont constants.

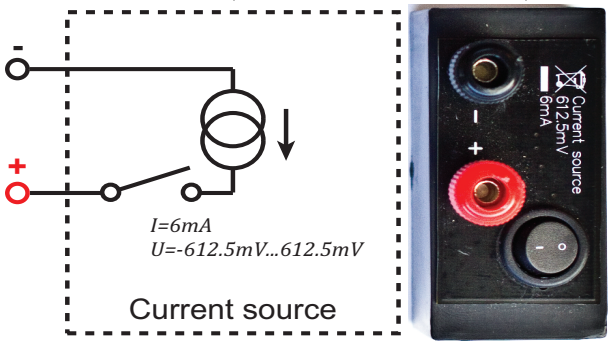
Dans ce problème, cependant, on considère un circuit contenant des éléments non-linéaires, enfermés dans une boîte noire, pour lesquels l'hypothèse de proportionnalité (linéarité) n'est plus valable.

Le matériel est composé d'un **multimètre** (étiqueté "IPhO-measure"), d'une **source de courant**, d'une **boîte noire** contenant des éléments non-linéaires, et de quatre fils de connexion. Attention de ne pas briser le sceau de la boîte.

Le multimètre peut mesurer simultanément le courant et la tension. Il vous permet d'enregistrer jusqu'à 2000 mesures, chacune contenant : la tension V, le courant I, la puissance $P = IV$, la résistance statique $R = V/I$, la dérivée temporelle de la tension $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$, celle du courant $\dot{I}$ et le temps t. Voir le manuel pour plus de précision. Si jamais vous alliez au delà de 2000 mesures, les anciennes données seraient effacées.

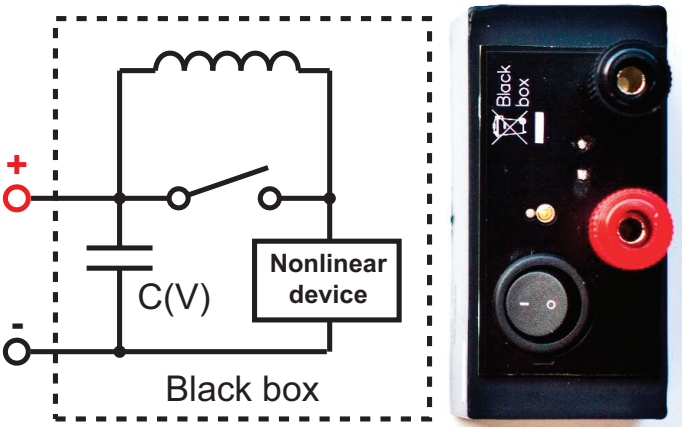


La source de courant fournit un courant constant tant que la tension à ses bornes reste entre $-0.6125\,\mathrm{V}$ et $0.6125\,\mathrm{V}$. Quand elle est éteinte, la source de courant se comporte comme une résistance très grande (considérée comme infinie).



La boîte noire contient un condensateur à double couche (condensateur de grande capacité, légèrement non-linéaire), un élément non-linéaire inconnu et une bobine $L = 10\,\mu\mathrm{H}$ de résistance négligeable, que l'on peut court-circuiter, comme indiqué sur le schéma. L'élément non-linéaire peut être modélisé par une résistance avec une relation non-linéaire entre la tension et le courant [$I = I(V)$ est une fonction continue de V avec $I(0) = 0$].

De même, la capacité différentielle $C(V) = dQ/dV$ du condensateur n'est pas tout à fait constante. **On dira que la tension aux bornes de la boîte noire est positive si le potentiel à la borne rouge est plus grand que celui à la borne noire. On obtiendra une tension positive sur la boîte noire, si sa borne rouge est connectée à la borne rouge du générateur.(il est possible d'utiliser des tensions négatives).**



Pour décharger le condensateur de la boîte noire, on peut sans danger le court-circuiter en reliant ses bornes directement. On peut également relier ses bornes aux bornes *IN* et *OUT* du multimètre : la résistance interne de ce condensateur est assez élevée pour que le courant n'endommage rien.

On ne vous demande aucun calcul d'incertitude dans ce problème.

Partie A. Circuit sans bobine *(7 points)*

Dans cette partie, on garde l'interrupteur de la boîte noire avec la position "I" enfoncée, de telle sorte que la bobine est court-circuitée.

Notez que certaines mesures peuvent prendre un temps considérable, on vous recommande donc de lire la partie A en entier pour éviter un travail inutile.

i. (1 pt) Vérifiez que le courant de sortie de la source de courant est approximativement 6 mA, et déterminer sa plage de variation pour des tensions comprises entre 0 et +480 mV. Tracez le schéma électrique du montage.

ii. (1.2 pts) Montrez que la capacité différentielle $C(V_0)$ utilisée dans la boîte noire vaut approximativement 2 Farads pour une tension V_0 de votre choix. Tracez le schéma du circuit.

iii. (2.2 pts) En négligeant la non-linéarité du condensateur [$C(V) \approx C_0$], déterminez la caractéristique courant-tension de l'élément non-linéaire présent dans la boîte noire. Tracez la courbe $I(V)$ sur votre Document Réponse pour les tensions positives prises sur toute la plage de tension accessible. Tracez le schéma du circuit.

iv. (2.6 pts) En utilisant les mesures prises sur toute la plage de tension accessible, calculez et tracez la courbe $C(V)$ sur votre Document Réponse. Notez la valeur minimale et la valeur maximale de la capacité différentielle $C_{\min}, C_{\max}$. Tracez le schéma du circuit.

Partie B. Circuit avec bobine *(3 points)*

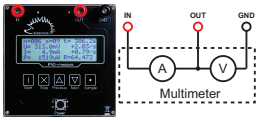
Enclenchez la bobine en ouvrant l'interrupteur sur la boîte noire (en passant à la position "0" enfoncée). En utilisant la même méthode qu'en **A-iii**, mesurez et tracez la caractéristique courant-tension de l'élément non-linéaire. Expliquez qualitativement toutes les différences notables entre les courbes des parties A et B. et Ici, il est nécessaire que vous sachiez que l'élément non-linéaire possède en plus une capacité (environ 1 nF) qui est branchée en parallèle avec la résistance non-linéaire. proposez en une explication en utilisant des arguments qualitatifs.

IPhO-measure : petit manuel d'utilisation

IPhO-measure est un multimètre capable de mesurer la tension V et le courant I simultanément. Il mesure également leurs dérivées temporelles $\dot{V}$ et $\dot{I}$, leur produit $P = VI$, leur rapport $R = V/I$, et le temps t de la mesure. Les mesures sont stockées par séries séparées ; chaque mesure est répertoriée par le numéro de sa série s et une adresse n dans la série. Toutes les mesures sont inscrites dans une mémoire flash interne et peuvent ensuite être récupérées.

Comportement électrique

L'appareil se comporte comme un ampèremètre et un voltmètre connectés de la façon suivante :



	Plage	Résistance interne
Voltmètre	0 . . . 2 V	1 MΩ
Voltmètre	2 . . . 10 V	57 kΩ
Ampèremètre	0 . . . 1 A	1 Ω

Guide d'utilisation rapide

- Appuyez sur le bouton "Power" pour allumer l'*IPhO-measure*. L'appareil ne mesure pas encore : pour débuter les mesures, appuyer sur "Start". Une fois allumé, vous pouvez également consulter vos données enregistrées, voir plus bas.
- Pour visualiser les mesures prises auparavant (sur toutes les séries), appuyez sur "Previous" ou "Next". Maintenez la pression plus longtemps pour passer directement d'une série à l'autre.
- Si aucune mesure n'est en cours, appuyez sur "Start" pour commencer une nouvelle série de mesures.
- Pendant la mesure, **utilisez le bouton "Sample" pour enregistrer une mesure**.
- Même pendant une mesure, vous pouvez consulter les autres mesures en utilisant les boutons "Previous" et "Next".
- Appuyez sur le bouton "Stop" pour terminer une série de mesures. L'appareil est toujours allumé, vous pouvez débuter une nouvelle série de mesures, ou consulter vos données enregistrées.
- Le bouton "Power" permet d'éteindre l'appareil. L'appareil affichera le texte "my mind is going" ; ne vous inquiétez pas, toutes les mesures seront enregistrées et vous pourrez les consulter après que vous ayez rallumé l'appareil. Les données enregistrées seront conservées.

Affichage

L'affichage d'une mesure donne les valeurs de neuf grandeurs :

1. l'index n de la mesure dans la série ;
2. le numéro s de la série ;
3. le temps t écoulé depuis le début de la série de mesures ;
4. la tension relevée par le voltmètre V ;
5. la vitesse de variation de V (sa dérivée par rapport au temps $\dot{V}$). Si V varie trop rapidement pour pouvoir le dériver, l'appareil affiche"`+nan/s`" ;
6. le courant relevé par l'ampèremètre I ;
7. la vitesse de variation de I (sa dérivée par rapport au temps $\dot{I}$). Si I varie trop rapidement pour pouvoir le dériver, l'appareil affiche"`+nan/s`" ;
8. le produit $P = VI$;
9. le rapport $R = V/I$.

Si une de ces grandeurs est hors de la plage de travail, l'appareil affiche "`+inf`" ou "`-inf`".